



可液化场地土工抗震

动态离心机试验与数值模拟

汪明武 著



科学出版社

可液化场地土工抗震动态 离心机试验与数值模拟

汪明武 著

国家自然科学基金项目(项目编号: 41172274; 40702049)

安徽省杰出青年科学基金项目(项目编号: 08040106830)

安徽省自然科学基金项目(项目编号: 01045409)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在作者多年来从事可液化场地土工抗震问题的动态离心机试验与数值模拟及不确定性风险评价研究所取得的科研成果的基础上撰写而成的。书中系统论述了该领域国内外的研究现状和进展。详细介绍了针对可液化场地特点的动态土工离心机试验模型方法,阐述了基于多重剪切塑性模型和液化状态面概念的、考虑主应力轴方向偏转的有效应力分析方法,系列开展了桩基、地下结构物和堤坝等重要工程的动态离心机试验和数值反演及理论探索,以及其他可液化场地重要构筑物的抗震稳定和结构物-液化土相互作用机制问题的探讨,同时还详述了基于可靠性理论、遗传算法、盲数理论等不确定性理论的地震液化智能风险评价方法的基本原理、实现过程、应用实例及对比分析,反映了地震液化智能风险分析研究的新进展。

本书可供土建、矿山、交通、水利、交通和能源等行业的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生的教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

可液化场地土工抗震动态离心机试验与数值模拟 / 汪明武著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-036050-2

I. ①可… II. ①汪… III. ①离心机-研究 IV. ①TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 274907 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年12月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张: 12

字数: 230 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

我国是地震多发国家,液化是主要的地震灾害形式之一。随着城市化和工程建设规模的加速,可液化场地潜在地震危害性日益突出,可液化场地土工抗震问题已威胁到城市安全,已成为我国大中城市可持续发展的瓶颈问题之一,是相关学科近年来亟待解决的课题。

强震条件下可液化场地具有大变形、侧向流动和孔压骤升等特点,而深入揭示强震作用下可液化场地土工构筑物的破坏机制和抗震安全性,必须针对可液化场地特点和考虑相互作用机制开展研究,应用一般研究方法很难实现上述目标,但近期发展起来的动态土工离心机试验则能实现在与原型相同或比拟的应力状态下观测可液化场地土工构筑物的大变形、孔隙水压力骤变等地震响应特性,且具有真实性好与可靠性高等优点。然而土工离心模型试验也存在边界条件处理难、试验技术要求高、理论探索和成果外推研究费用高等不足,而数值方法则可弥补以上缺陷,且具有影响因子可控的优点。因此,将上述两者结合起来的、相互反馈验证的研究方法,在可液化场地土工抗震问题研究中可充分发挥两者优势,且能互补,能最大满足土工抗震问题研究涉及面广、客观制约因素复杂与探索一般规律等的需求,也有益于揭示强震条件下可液化场地土工构筑物的破坏机理及结构物与可液化场地的相互作用机制,促进我国动态土工离心模型试验技术和数值反演方法的发展。

本书凝聚了作者多年来在可液化场地土工抗震动态离心机试验和数值模拟及液化势评价方面的最新研究成果,反映了土工抗震研究的发展趋势。作者有幸从20世纪90年代步入了土动力学与土工抗震工程的研究队伍,开始了对地震液化势评价模型及工程应用的学习和探索,提出了基于可靠性理论、最优化理论、不确定性理论及风险理论的智能风险可视化评价模型;在日本留学期间开始开展可液化场地土工抗震问题动态离心机试验研究,发展了饱和液化土层模型的制备新方法,其突破了饱和可液化场地试验模型制作瓶颈,在可液化场地桩基、地下结构物和堤坝抗震性能的动力离心机试验方面提出了自己的见

解;针对强震条件下可液化场地特点和基于试验结果,探求了适于反演地震液化侧向流动、大变形和超孔隙水压力骤升等特点的二维、三维有效应力分析方法,从而弥补了以往在各向异性固结周期特性的主应力轴方向偏转数值分析方面的缺陷。

我国动态离心机试验技术和相应的数值分析方法发展相对较晚,且目前尚未有针对可液化场地土工抗震动态离心机试验与数值模拟的著作,本书是作者结合多年来主持完成的、多项相关的国家自然科学基金项目和安徽省杰出青年科学基金项目及其他科研项目、科研报告和在国内发表的相关学术论文撰写而成。希望本书的出版起到抛砖引玉的作用,为可液化场地土工抗震问题的动态离心机试验和数值模拟研究提供参考。

本书内容涉及可液化场地土工抗震问题的各个方面,共分七章。第一章为绪论;第二章介绍动态土工离心模型试验;第三章论述土工抗震性状有效应力分析方法;第四章叙述可液化场地桩基抗震性能动态离心机试验与数值模拟;第五章阐述可液化场地地下结构物抗震性能动态离心机试验与数值模拟;第六章详述可液化场地堤坝抗震性能动态离心机试验与数值模拟;第七章介绍地震液化势评价。

本书所反映的部分研究成果得到了国家自然科学基金项目(项目编号:41172274,40702049)、安徽省杰出青年科学基金项目(项目编号:08040106830)和安徽省自然科学基金项目(项目编号:01045409)等资助,谨表谢忱!感谢作者的博士后导师 Iai Susumu 教授的指导和 Tobita Tetsuo 博士的热情帮助。同时衷心感谢在本书编排和校阅过程中所付出辛勤劳动的各位编辑老师。

土工抗震是一个正在发展的、实践性强的领域,无论在试验技术和数值分析方法,还是在应用实践,均有待深入研究。面对可液化场地土工抗震问题本身的复杂性,作者深知,以上粗浅认知与进展是微不足道的,谨以此书与同行们共勉。由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2012年8月于合肥

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 可液化场地特性	3
1.2.1 地震液化概念	3
1.2.2 地震液化机理	3
1.2.3 地震液化影响因素	7
1.2.4 地震液化势评价概述	8
1.3 可液化场地土工抗震研究现状	8
1.3.1 理论分析	8
1.3.2 试验研究	9
1.3.3 数值模拟	10
参考文献	12
第二章 动态土工离心模型试验	15
2.1 土工离心模型试验发展概况	15
2.2 动态土工离心机试验系统	16
2.2.1 土工离心模型试验基本原理	16
2.2.2 动态土工离心机系统简介	16
2.2.3 土工离心机试验误差分析	18
2.3 动态土工离心试验模型设计要点	19
2.3.1 模型制作与相似比	19
2.3.2 土槽选择	20
2.3.3 传感器及数据采集	20
2.4 动态土工离心模型试验与数值模拟	21
参考文献	22
第三章 土工抗震性状有效应力分析方法	23
3.1 引言	23
3.2 基于多重剪切机构塑性模型的有效应力分析方法	24
3.2.1 多重剪切机构塑性模型	24
3.2.2 基于液化状态面的孔压增长模型	28

3.2.3 多重剪切机构塑性模型的细观分析	30
3.2.4 强度准则	35
3.2.5 动力方程	36
3.2.6 骨干曲线非线性修正	38
3.2.7 分析流程	42
3.3 小结	43
参考文献	43
第四章 可液化场地桩基抗震性能动态离心机试验与数值模拟	45
4.1 引言	45
4.2 水平液化场地桩基抗震性能动态离心机试验	46
4.2.1 离心机试验模型	47
4.2.2 试验步骤	51
4.2.3 试验结果及分析	51
4.3 倾斜液化场地桩基抗震性能动态离心机试验	58
4.3.1 倾斜液化场地离心机试验模型	58
4.3.2 试验结果及分析	60
4.4 液化场地侧向流动中桩基地震响应有效应力分析	65
4.4.1 倾斜液化场地桩基地震响应数值分析	65
4.4.2 邻近边坡液化场地侧向流动中桩基抗震性能数值模拟	69
4.5 微型斜桩地震响应数值模拟	77
4.5.1 简述	77
4.5.2 数值仿真模型	77
4.5.3 模拟结果及分析	79
4.6 小结	82
参考文献	83
第五章 可液化场地地下结构物抗震性能动态离心机试验与数值模拟	86
5.1 引言	86
5.2 可液化场地地下结构物抗震性能离心机试验研究	87
5.2.1 地下钢筋混凝土结构物	87
5.2.2 地下钢结构物	97
5.3 可液化场地地下结构物地震响应数值仿真研究	105
5.3.1 钢筋混凝土结构物	105
5.3.2 钢结构物	123
5.4 小结	128
参考文献	129

第六章 可液化场地堤坝抗震性能动态离心机试验与数值模拟	131
6.1 引言	131
6.2 动态土工离心试验模型	132
6.2.1 试验模型	132
6.2.2 试验步骤	133
6.3 数值模拟模型	133
6.3.1 二维有效应力分析模型	134
6.3.2 三维有效应力分析模型	135
6.4 结果及分析	135
6.4.1 变形	135
6.4.2 加速度	140
6.4.3 超孔隙水压力	144
6.4.4 有效应力路径	145
6.5 小结	147
参考文献	148
第七章 地震液化势评价	149
7.1 引言	149
7.2 液化势智能可视化评价模型	150
7.2.1 基于最优化理论的评价模型	150
7.2.2 基于可靠性理论的液化势评价模型	153
7.2.3 基于随机模拟技术的评价模型	155
7.2.4 基于 BP 神经网络的智能评价模型	158
7.2.5 基于混合遗传算法的智能风险分析模型	162
7.2.6 基于可拓理论的评价模型	168
7.2.7 基于投影寻踪分析的可视化评价模型	171
7.3 基于盲数理论的液化等级风险分析	177
7.3.1 简述	177
7.3.2 盲数理论简介	177
7.3.3 液化等级盲数风险评价模型	178
7.3.4 实例应用	179
7.4 小结	182
参考文献	183

第一章 绪 论

1.1 引 言

砂土液化是地震灾害主要形式之一,可引起地基强度丧失,导致重要生命线工程瘫痪和建筑物破坏加重,造成巨大经济损失和人员伤亡,日本新潟地震(1964),美国阿拉斯加地震(1964),我国的邢台地震(1966)、海城地震(1975)、唐山地震(1976)、汶川地震(2008)等的地震灾害均已证实。地震液化灾害宏观上主要表现为地表喷砂、基础失效、液化上浮、侧向扩展和震陷等现象,如1964年日本新潟地震中,地震液化导致地基失效,造成建筑物倾倒[照片1.1(a)]和地表喷砂[照片1.1(b)];2004年新潟地震中原埋藏地下的窰井因地震液化发生上浮现象(照片1.2);1995年阪神地震中,地下隧道覆土较浅区段大量混凝土中柱遭受破坏[照片1.3(a)],同时地震液化使大量桥梁、码头、建筑物发生重大破坏,地表产生震陷[照片1.3(b)]。我国1975年海城地震灾害调查表明液化区受震害比率均高出其他区数倍;1976年唐山7.8级大地震中地震液化导致大量桥基失稳;2008年汶川8.0级大地震中地震液化导致大量的房屋因基础沉降而整体倒塌^[1-8]。可见,地震液化灾害是严重威胁城市安全的重要潜在因素。



(a) 地基失效, 建筑倾倒



(b) 喷砂

照片 1.1 1964 年新潟地震地震液化灾害现象



照片 1.2 2004 年新潟地震管井地震液化上浮现象



(a) 地铁中柱破坏



(b) 震陷

照片 1.3 1995 年阪神地震地震液化灾害现象

我国地处环太平洋地震带、地中海至喜马拉雅山地震带之间,地震活动频繁,20 世纪以来我国发生了 7 级以上强震的数目占全球 35%,强震造成死亡人数约占全球的 50%,位居世界之首,显然高烈度区的城市防震减灾问题已日益严重威胁着城市 and 人类的安全,是我国面临的重大安全问题,它们已成为制约我国大中城市可持续发展的瓶颈问题之一,而土工抗震则是防震减灾工作的重要环节,其中液化场地土工抗震问题显然是工程界亟待解决的重要课题。而且我国国土面积一半以上位于地震烈度Ⅶ度区,经济发达和人口密集城市多位于沿海可液化场地,随着城市化和工业化进程的加快及经济人口的增长,当遭遇强震极易诱发大面积液化灾害,所产生的后果将不堪设想。因此,随着城市化发展,地震液化的潜在危害性已

日益突出与加剧,开展可液化场地土工抗震研究显得日益迫切和尤为重要,其可为可液化场地土工构筑物的抗震稳定性和安全性分析提供理论支持,完善可液化场地土工抗震理论,可保障今后高烈度区的重要工程和生命线工程的安全运行,以及提升我国以城市安全为核心的防震减灾水平具有重大意义,并具有显著的经济效益和社会效益。

地震砂土液化评价是工程安全分析中的重要内容,相对应的可液化场地土工构筑物的抗震安全性和稳定性分析更是防震减灾工作的重点。然而,在强震作用下,可液化场地具有大变形、侧向流动等非线性特点,应用传统的动力学研究手段已很难揭示土工构筑物的破坏机制,也很难满足现在大型工程风险设计的需求,而最近发展起来的动态离心机试验技术与有效应力分析方法的综合研究方法则为此提供了新的研究途径。为此,作者基于主持完成的、与动态离心机试验技术相关的国家自然科学基金项目和安徽省杰出青年科学基金项目等项目,系统阐述了可液化场地土工抗震性能动态离心机试验和数值模拟及液化势的智能风险评价模型,以为可液化场地土工抗震问题的动态离心机试验和数值模拟及分析研究提供参考,促进我国动态土工离心模型试验技术与数值反演的发展。

1.2 可液化场地特性

1.2.1 地震液化概念

国内外至今对地震液化的定义尚未统一。美国岩土工程学会土动力学委员会认为“液化是任何物质转变为液体的作用和过程,在无黏性土中这种转变是由固体状态转变为液态,是孔压增大、有效应力减小的结果”^[9];日本土力学与基础工程学会则在《土力学与基础工程词典》一书中将其定义为“饱和砂土由于孔隙水压力的升高而引起剪切强度的丧失和有效应力降低,这种状态称为液化”;我国通常认为液化是指物质从固体状态转变为液体状态的条件和过程。可见,地震液化的定义应包含强度损失、宏观性质及状态改变等特征。

1.2.2 地震液化机理

地震液化机理受诸多不确定因素影响与控制一直是工程界和学术界的研究课题。人们基于理论分析、现场调查和室内试验对地震液化机理进行了研究和探索,其中研究最多的是美国和日本,Casagrande 最早基于临界孔隙比的概念解释了砂土液化现象,而 Seed 等通过室内动三轴试验的结果,提出了初始液化(initial liquefaction)概念^[1,3],认为饱和砂土在振动或循环荷载作用下,孔隙水压力上升导致

有效应力下降甚至消失,从而造成可液化场地失稳和建筑物破坏,并提出了相应的砂土液化简化判别法,至今还广泛应用。目前地震液化产生机理主要有循环活动性(cyclic mobility)、流滑(flow slide)、砂沸(sand boil)三种。下面主要从微观层次来分析地震液化机理。

地震引起土体颗粒间作用力减弱是土层发生液化的本质原因。由于土体的非均匀性,土粒质量不同,造成作用于骨架“节点”上的应力不同,地震过程中又会产生新的节点或改变原有节点应力大小。当节点应力超过骨架强度时,骨架结构发生破坏,致使应力重分配,并使破坏节点的范围不断扩大,相应土体在宏观上表现出抗剪强度降低和变形。当应力传递给水,则可引起超孔隙水压力,若土颗粒自重和超孔隙水压力大小相当时,土粒处于悬浮状态,当土体有效围压趋向于零附近时,土体转变为液态,将导致上覆土工构筑物大变形和侧向流动等灾害。可见,地震液化与土体剪胀特性密切相关,剪胀是指砂土承载剪切作用时的体积变化特性,剪胀包括体积膨胀(正剪胀)和体积收缩(负剪胀或剪缩)两种。密实土层在地震作用下表现出剪胀特性[图 1.1(a)],而松砂层受地震作用时常表现出剪缩特性,引起超孔隙水压力上升,有效应力降低[图 1.1(b)]。

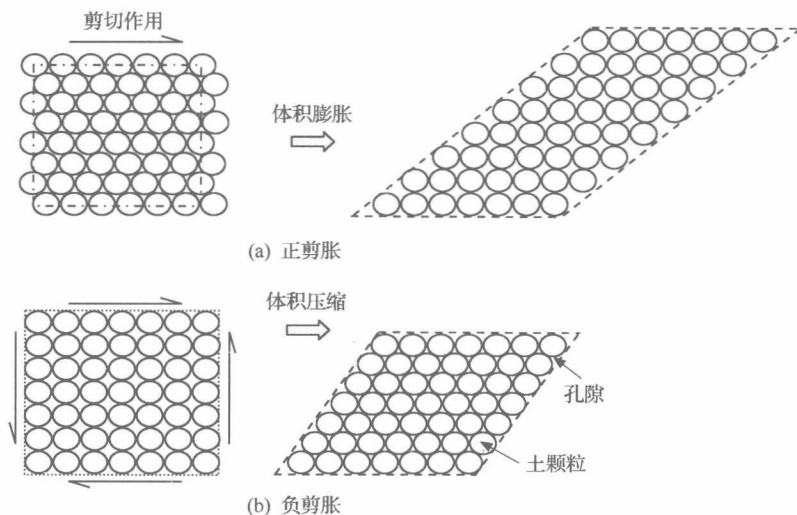


图 1.1 砂土的剪胀特性

图 1.2 和图 1.3 为相对密度为 80%、初始孔隙比为 0.78 的饱和砂土在剪应比为 0.2、有效围压为 100kPa 条件下中空土柱动三轴试验的实测结果。图 1.2 结果表明,虽然试样的相对密度较高,但随着循环荷载次数的增加,剪切应变相应增大,且当剪切应变大于 5% 时,明显可见剪切应变增长率加大,特别是当土体的剪应力降低到零附近时,相应的有效应力也降低,但随后剪应变则迅速增长,而剪应

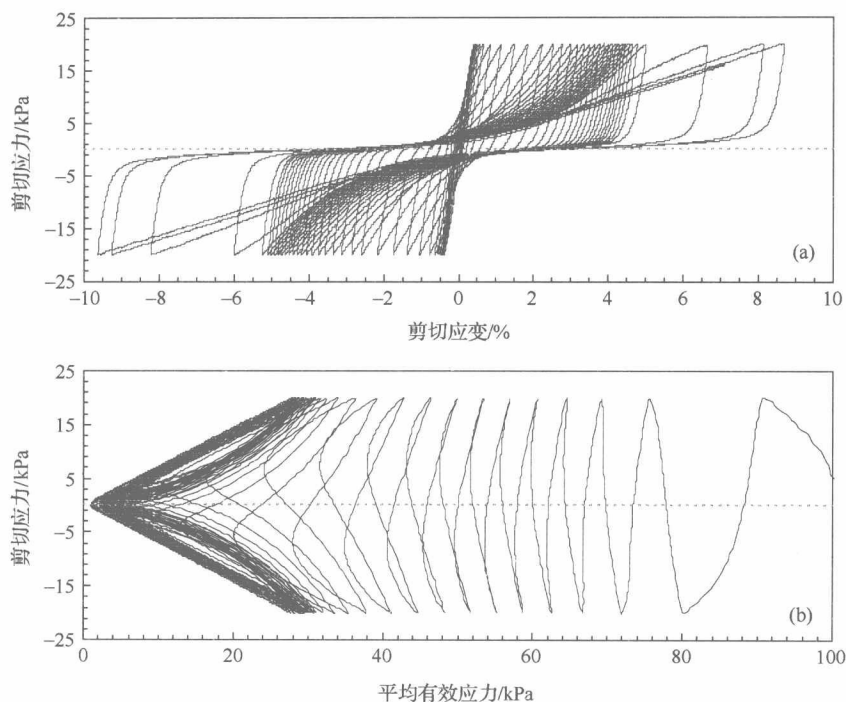


图 1.2 砂土动三轴循环作用下应力路径

力则几乎不变,土体表现出无剪切刚性特点。当循环荷载达到 26 次,超孔隙水压力增长至与上覆初始有效应力相等,试样发生液化现象(图 1.3)。饱和砂土发生地震液化过程的应力路径变化趋势见图 1.4 所示,对于水平饱和和土层在循环荷载作用下,土体某点应力状态相应的应力莫尔圆圆心随着振动发展而逐渐趋向原点,随着土体发生液化,应力莫尔圆半径趋于零。

在循环荷载作用下饱和砂土的动力失稳过程是一个复杂的变化过程,整个过程中伴随着孔压和强度的变化及变形的增长。若土层的总应力一定,则土体一般在排水循环荷载作用下呈现剪缩特性,土体孔隙比趋向降低,呈现图 1.5 中 ab 曲线特征;而对非排水条件,因体积不变化,而当土体发生剪缩时,相应的有效应力会降低,故在 e - $\log$ 曲线中呈现 bc 曲线趋势,以确保孔隙比不变条件,则相应的超孔隙水压力呈现增长现象。但对于实际可液化场地,土体完全液化是伴随着具有一定强度的反复剪切才达到的,且即使土体渗透系数小,地震时因压力作用地下水也会向地表流动,表现为地表喷砂现象[照片 1.1(b)]。随着超孔隙水压力的消失,土粒又重新排列直至达到新的稳定,并承担外力和自重,但土粒的排列一般较震前紧密,宏观上表现为震陷现象[照片 1.3(b)]。

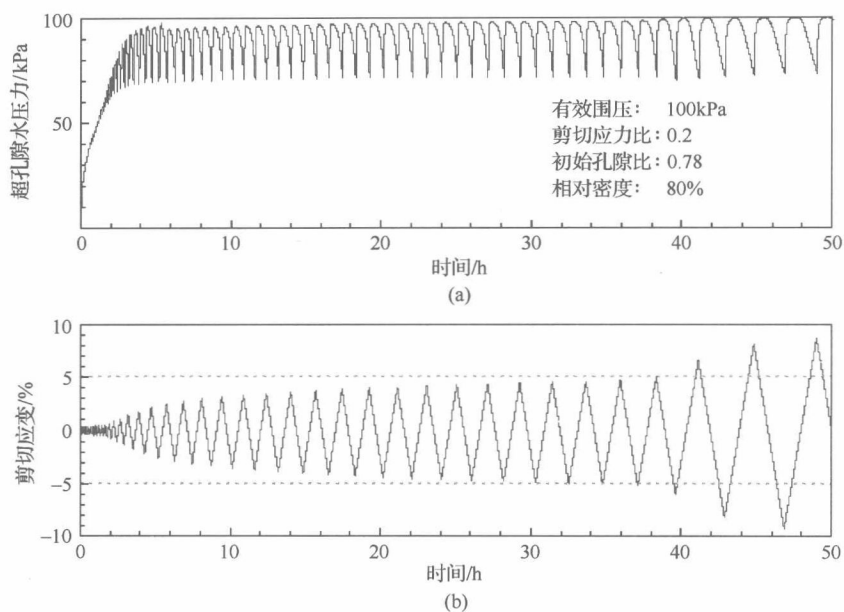


图 1.3 动三轴循环作用下砂土超孔隙水压力和剪切应变增长特征

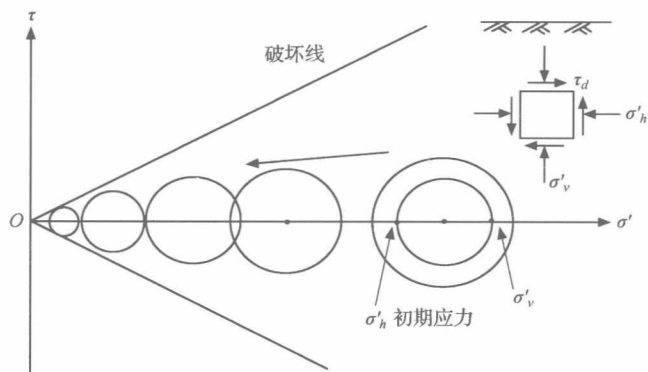


图 1.4 地震液化发展过程中莫尔应力圆

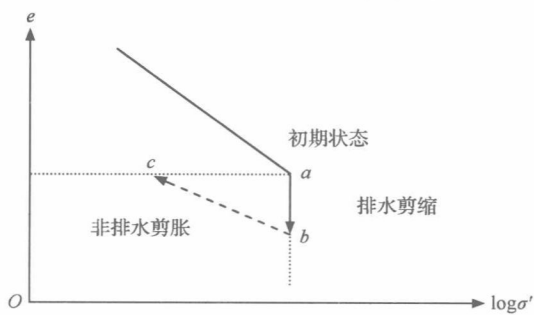


图 1.5 超孔隙水压力增长机制示意图

综上所述,地震液化是一个极其复杂的过程,其机理至今尚未统一认识,从最初的循环流动性、临界孔隙比机理,发展到稳态强度机理和剪切稀化非牛顿流体机理,均促进了液化理论的发展。人们对砂土和黏性土液化机理进行了系统的研究,并取得了较为丰富的成果,但至今对粗粒土地震液化机理研究则鲜有报导,然而历史地震(海城地震、阪神地震、唐山地震、汶川地震等)中都发现有砂砾土液化的现象,故地震液化机理尚有许多问题有待深入研究和探讨。

1.2.3 地震液化影响因素

地震液化受诸多不确定因素的影响与控制,国内外研究表明地震液化主要受土性、初始应力状态、动载条件等因素影响^[1-4],现简述如下。

1. 土性

土性对地震液化影响主要有土粒粒径、黏粒含量、孔隙特性和相对密度等因素。一般土层的孔隙比越小、相对密度越大、颗粒愈粗、级配不佳时土层越难发生液化。当粗砾较少不足以构成砂土骨架,而粉细砂占很大部分的时候,土体也可能液化,如汶川地震中砂砾液化现象^[8]。

2. 初始应力状态

初始应力状态是指土体单元受地震或振动荷载作用前的自重应力状态,它对土体抗液化能力的影响十分明显。历史震害调查结果表明,土层埋藏愈深愈难发生液化^[1-3]。相同试样在三轴试验中较单剪试验和振动台试验更难发生液化^[9],反映了应力状态对液化发展有影响,且对于一个给定的循环次数,引起液化所需要的脉动剪应力随着围压的增大而增大。

3. 动荷载条件

地震强度、循环次数或地震延续时间不同,直接影响着地震液化的灾害程度。地震强度是饱和土层是否发生液化的决定性因素之一。同等条件下,地震强度越大,离震中越近,震源越浅,土体愈容易液化,震害愈重。试验表明在同一地震强度作用下,振动的频率与土体液化的关系不明显,但振动持续时间对液化的影响很大^[3],因土体的超孔隙水压力是伴随着循环荷载的作用而逐渐上升,故液化产生需地震持续一定的时间,并与上升速度与排水条件等因素有关,如土体在实际地震条件下较单向振动更易液化。

4. 其他因素

地下水埋深、地形地势和土层形成年代等其他因素对地震液化的影响也不可

忽略^[4]。地下水埋深越浅,砂土上覆有效应力减小,相应土层越容易液化。地形地势对液化震害发展有着重要影响,如液化侧向扩展,故地震液化灾害评估时,应考虑地表倾斜和场地等其他条件。

1.2.4 地震液化势评价概述

地震液化评价是场地地震安全性评价、地震小区划和震害预测中的首要任务,故地震液化势评价一直受到工程界的关注。国内工程界目前采用的评价方法主要为规范法、概率法和动剪应力法等分析方法,但总体上尚停留在 30 年前的水平^[8],已不能满足重大工程对风险管理和风险设计的需求,因纯概率法评价信息的不确定性、动剪应力法原状土样难以获得等缺陷,常使评判结果同实际现象相差很大;规范法则是一种确定性方法,评价时以点代层,不能确切反映潜在液化场地的空间性质,不利于工程可靠性设计和风险评价应用。为反映地震液化震害评价的非线性和空间特征,将最优化理论、可靠性分析方法、遗传算法和地理信息系统引入地震液化势评价^[6, 10, 11],可实现充分利用智能优化理论解决非线性问题的优越性和空间分析液化势特性,从而提高了地震砂土液化的智能评价和预报准确水平,增强了工程抗震设计和方针措施的针对性,也将提高可液化场地地震液化灾害的风险管理与决策应用水平。

1.3 可液化场地土工抗震研究现状

可液化场地土工抗震问题一直受到国内外工程界的关注,其研究由最初的理论分析和基于动力参数的数值研究,发展到重视现场调查、现场试验、模型试验的综合研究方法,相应的抗震减灾新技术和工程措施的研究也得到重视和发展。我国虽有很多关于砂土液化现象的历史文献记载,但真正研究始于黄文熙、汪闻韶等 20 世纪 60 年代应用动三轴试验对坝坡的动力特性、孔隙水压力消散和扩散及粉土液化问题的研究^[12],并得到国际土动力学学界的认可。唐山大地震也促进了我国土动力学的发展,在地震液化宏观调查、地形地貌对建筑受灾影响方面取得许多有益的成果,并把砂土液化判别方法列入《工业与民用建筑设计规范》。国外随着新潟地震(1964)灾害调查和 VELACS 课题的开展^[13-15],均大大提高了国际土动力学的地位和促进了发展,并取得了许多有益的成果和进展。下面就可液化场地土工抗震研究的理论分析、试验和数值研究的国内外研究现状作进一步阐述。

1.3.1 理论分析

近 20 年来,随着计算技术及量测技术的发展,土工抗震理论分析已从最早的等效线性地震总应力分析方法,发展为非线性三维分析方法^[16-19]。Biot 建立的土

体固结过程中孔隙水压力的消散和土骨架变形过程中的耦合作用方程,为土工抗震问题的有效应力分析理论奠定了基础;20世纪80年代 Zienkiewicz 等基于孔隙水压力和动力反应分析耦合模型提出了动固结理论,这大大促进了地震液化分析理论的发展^[20]。土体动力本构模型是砂土动力学中最基本的力学关系,关系到土体动力特性分析的正确性,一直是地震岩土工程和土动力学的研究热点,国内外学者基于理论和试验研究结果提出了线弹性模型、黏弹性模型、弹塑性模型、边界面模型、内时模型和结构性模型等本构模型。土体和地震本身的复杂性,也决定了统一形式的本构模型是一种理想。但随着各种测试技术的发展,对复杂往返加载条件下砂土真实的应力-应变规律,特别是对循环剪切作用引起的体应变规律及其变化机理的认知正在逐渐加深,推动了砂土动本构理论研究的深入和发展,其从早期的将土视为线弹性或黏弹性介质的研究,发展到由细观组构出发、以描述“循环效应”和“速率效应”为核心,注重揭示细观组构变化与宏观力学响应之间的定量关系的本构模型^[21]。另外,如何正确预测可液化场地在循环荷载或地震荷载作用下,孔隙水压力的产生、增长和消散规律,是揭示可液化场地土工构筑物破坏机理问题的重要环节。国内的黄文熙和汪闻韶先生在这方面作了开拓性的研究,国内外学者,如门福录、沈珠江^[21]、谢定义、张克绪^[22]、Zienkiewicz 和 Pande、Towhata 和 Ishihara^[23]、Finn、Iai^[24]等在这方面做了大量有益的研究工作。然而,对于土工抗震问题,理论分析方法一般只能用于求解模型较简单的情形,随着计算机和试验技术的发展,人们更多是基于试验和数值分析方法对土工抗震问题开展研究。

1.3.2 试验研究

试验研究方法一直是土工抗震性能研究的主流研究方法,其主要有现场试验、土动力学试验、振动台试验和土工离心模型试验等方法。

现场试验和调查是在实际地震激励下观测与分析现场土工构筑物的破坏机理与响应。现场试验获得成果可靠,但该法受到地震的不可预见性和成本大等条件限制,至今开展很有限,仅在地震多发的日本开展了相关试验研究。另外,现场地震震害调查方法无法主动改变影响因素,很难对地震过程中的动力响应某一方面进行有目的、多角度的研究,研究成果在理论推广研究上受到限制。

室内土动力学试验方法是研究场地土动力参数的常用方法^[25],其主要有共振柱试验、振动直剪试验、动扭剪试验和动三轴试验等。随着双向振动三轴仪、空心扭剪仪等大量设备的开发和使用,其研究已经由简单循环荷载逐步发展到复杂应力路径和不规则荷载作用下的土体动力特性研究。近年来发展起来的压电弯曲元剪切波速测试技术,已应用于土样小应变剪切模量的各种试验和土工离心模型试验中,为土体刚度的实时监测提供了有效的技术手段^[26];显微数码摄录技术开始应用于砂土细观结构的动态变化观测^[27],为土动力学开辟了新的研究思路。然